

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ –
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Hornicko-geologická fakulta

Institut geologického inženýrství

LABORATORNÍ STANOVOVÁNÍ PERMEABILITY DANÝCH VZORKŮ
IZOLAČNÍCH SMĚSÍ URČENÝCH K VYPLNĚNÍ STARÝCH DŮLNÍCH DĚL

bakalářská práce

Autor:

Andrea Petřkovská

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Michal Porzer

Ostrava 2014

Zadání bakalářské práce

Student: **Andrea Petřkovská**
Studijní program: B2110 Geologické inženýrství
Studijní obor: 2101R003 Geologické inženýrství
Téma: **Laboratorní stanovování permeability daných vzorků izolačních směsí určených k vyplnění starých důlních děl**
Laboratory Research of Permeability on Insulating Mixtures Labels Specified to Filling of Underground Mine Spaces

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Permeabilita jako jedna z fyzikálních parametrů geologického prostředí
3. Laboratorní stanovení permeability daných vzorků izolačních směsí
4. Interpretace a analýza naměřených dat
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

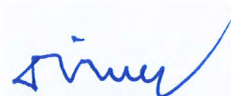
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Porzer**

Datum zadání: 31.10.2013

Datum odevzdání: 20.08.2014



doc. Ing. Nad'a Rapantová, CSc.
vedoucí institutu



prof. Ing. Vojtech Dirner, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

- Celou bakalářskou práci včetně příloh, jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem použité podklady a literaturu.
- Byla jsem seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. –autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § - školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečné, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Souhlasím s tím, že bakalářská práce je licencovaná pod Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence, je možné navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne 20. 8. 2014

Andrea Petřkovská

Anotace bakalářské práce

V této práci je nastíněná problematika stanovení permeability na vzorcích jádra z pokusného komínu vyplněného cemento-popílkové izolační směsí. Znalost této problematiky může napomoci pochopení kontaktu mezi proudícím plynem a výplňovou směsí. V první části je popsána permeabilita jako jedna z fyzikálních vlastností. Součástí je i popis cemento-popílkové směsi. Další části jsou věnovány popisu testovacího komínu, ve kterém byla směs testována, laboratornímu měření, výsledkům měření a interpretaci dat získaných ze vzorků cemento-popílkové směsi. Testovaná směs vykazovala velmi slabou až slabou propustnost a značný pokles se projevil v prvních 90 dnech od zalití testovacího komínu po kterých již propustnost nevykazovala zásadní změny.

Klíčová slova: permeabilita, propustnost, laboratorní experiment, cemento-popílková směs, relikvidace starých důlních děl

Summary

In this bachelor is the outlined issue of determining the permeability on drill core samples from experimental chimney filled with cement-fly ash insulating mixture. Knowledge of this issue may help to understand the contact between flowing gas and filling mixtures. In the first section is the description of permeability as one of the fundamental physical properties. It also includes a description of cement-fly ash mixture. The next sections deal with the description of the testing stack, in which the mixture was tested, laboratory measurements, measurement results and interpretation of data obtained from cement-fly ash mixture samples. Test mixture showed very weak to weak permeability and considerable decrease reflected in first 90 days from pouring of the testing stack. After the first 90 days the permeability of the insulating mixture did not show any further changes.

Keywords: permeability, laboratory evaluation, cement-fly ash mixture, old mining adits re-abandonment

Obsah

1	ÚVOD	2
2	PERMEABILITA JAKO JEDNA Z FYZIKÁLNÍCH PARAMETRŮ GEOLOGICKÉHO PROSTŘEDÍ.....	3
2.1	ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ, TÝKAJÍCÍCH SE TEKUTIN A JEJICH PROUDĚNÍ.....	3
2.1.1	<i>Pórovitost</i>	<i>3</i>
2.1.2	<i>Smáčivost</i>	<i>5</i>
2.1.3	<i>Permeabilita neboli propustnost</i>	<i>6</i>
2.2	TYPY PROPUSTNOSTI.....	9
2.3	PERMEABILITA V PRŮLINÁCH, PUKLINÁCH A DUTINÁCH	11
2.4	ODHADY PERMEABILITY	11
2.4.1	<i>Empirické vzorce.....</i>	<i>12</i>
2.5	PERMEABILITA PRO KAPALINU A PLYN.....	14
2.5.1	<i>Měření permeability pro kapalinu</i>	<i>14</i>
2.5.2	<i>Měření permeability pro plyn</i>	<i>14</i>
3	LABORATORNÍ STANOVENÍ PERMEABILITY DANÝCH VZORKŮ IZOLAČNÍCH SMĚSÍ	17
3.1	SLOŽENÍ CEMENTO-POPÍLKOVÉ SMĚSI.....	17
3.2	TESTOVÁNÍ CEMENTO-POPÍLKOVÉ SMĚSI V TERÉNU	18
3.3	TESTOVÁNÍ CEMENTO-POPÍLKOVÉ SMĚSI LABORATORNĚ.....	20
3.3.1	<i>Postup měření</i>	<i>21</i>
4	INTERPRETACE A ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT	22
4.1	HODNOCENÍ KLASIFIKACE PROPUSTNOSTI.....	23
4.1.1	<i>Vyhodnocení veličin jaderek z jádrového vrtu 28 dní po odlití pokusného komínu</i>	<i>23</i>
4.1.2	<i>Vyhodnocení veličin jaderek z jádrového vrtu 60 dní po odlití pokusného komínu</i>	<i>25</i>
4.1.3	<i>Vyhodnocení veličin jaderek z jádrového vrtu 90 dní po odlití pokusného komínu</i>	<i>27</i>
4.1.4	<i>Vyhodnocení veličin jaderek z jádrového vrtu 120 dní po odlití pokusného komínu</i>	<i>29</i>
4.1.5	<i>Vyhodnocení veličin jaderek z jádrového vrtu 180 dní po odlití pokusného komínu</i>	<i>31</i>
4.2	CELKOVÉ ZHODNOCENÍ CEMENTO-POPÍLKOVÉ SMĚSI	32
5	ZÁVĚR	34
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	35
7	SEZNAM ELEKTRONICKÝCH ZDROJŮ	37
8	SEZNAM TABULEK	38
9	SEZNAM GRAFŮ	39
10	SEZNAM ROVNIC	40
11	SEZNAM OBRÁZKŮ	41

1 Úvod

Permeabilita neboli propustnost (koeficient propustnosti) je vlastnost horninového prostředí propouštět svými volnými prostory tekutinu působením hydrostatického tlaku při vzniku hydrostatického spádu. Tuto vlastnost lze číselně vyjádřit koeficientem propustnosti k (m^2 , D). Stanovit ji lze laboratorně na permeamtru, kdy jednotlivé vzorky bývají upraveny do tvaru válce.

Cílem práce je testování cemento-popílkové směsi laboratorně pro stanovení permeability na instrukčním permeamtru (GasPerm firmy Vinci Technologies, Francie). Pro účely testování směsi v poloprovozních podmínkách, byla vybudována pokusná šachtice (komín) na lokalitě výsypky v Prostřední Suché, na které bylo odvrtno šest jádrových vrtů v intervalech 14, 28, 60, 90, 120 a 180 dní od vylití „komínu“. Z vrtných jader byly odvrtny pomocí vrtného přístroje Hilty jádérka (vzorky), na kterých po úpravě do tvaru válce proběhlo laboratorní stanovení permeability

Cemento-popílková směs, která je složená z elektrárenských popílků, cementu a křemitého písku by měla sloužit k vyplňování starých důlních děl za účelem např.: zamezení úniku metanu nebo zborcení štoly.

2 Permeabilita jako jeden z fyzikálních parametrů geologického prostředí

Geologické prostředí je tvořeno horninami, které lze rozdělit do tří základních skupin na základě podmínek, ve kterých vznikly tj. horniny magmatické, vzniklé krystalizací magmatu, horniny sedimentární vzniklé zvětřováním, přenosem, usazováním a zpevňováním a horniny metamorfované vzniklé přeměnou magmatických, sedimentárních nebo starších metamorfovaných hornin (*Šamálková et al 1995*). U magmatických a metamorfovaných hornin je propustnost ovlivněna množstvím a velikostí puklin (viz podkapitola 2.1.1 a 2.3), u sedimentárních je propustnost ovlivněna průlinami a dutinami (viz podkapitola 2.1.1 a 2.3). Mimo pevných částic jsou součástí geologického prostředí také kapaliny a plyny, jež mají různou stlačitelnost, teplotní roztažnost, vnitřní tření neboli vazkost (*Grmela 2007*). Kapaliny a plyny se souhrnně označují jako tekutiny (*Kopečný et al 2006*). Aby docházelo k jejich proudění horninovým tělesem, musí dané těleso obsahovat navzájem propojené dutiny. Navzájem propojené dutiny umožňují šíření hydrostatického tlaku a při vzniku hydrostatického spádu a po překročení odporových sil, proudí tekutina ve směru tlakového spádu. Tento stav horniny charakterizuje propustnost (*Grmela 2007*).

2.1 Základní vlastnosti horninového prostředí, týkajících se tekutin a jejich proudění

Mezi tyto základní vlastnosti týkajících se proudění tekutin patří součet všech volných prostor v horninovém tělese nevyplněné tuhou fází – pórovitost (*Bujok 1989*), vlastnost tekutiny přilnout k povrchu pevné části vzorku horniny - smáčivost (*Bártková, Klusoň 2014*) a schopnost horniny propouštět tekutiny působením tlakového spádu – permeabilita neboli propustnost (*Petroš 2002*).

2.1.1 Pórovitost

Součet všech volných prostor v horninovém tělese nevyplněné tuhou fází. Jedná se o různé dutiny, pukliny a průliny (*Bujok 1989*)

Průliny – prostory mezi zrny zpevněných a nezpevněných klastických sedimentů nevyplněné tuhou fází (*Grmela 2007*).

Pukliny - volný prostor mezi plochami nespojitosti ve zpevněných horninách (*Grmela 2007*).

Dutiny - jejich původ je různý (krasové dutiny, důlní díla, lávové kanály apod.) (Grmela 2007).

Podle potřeb pro praxi rozlišujeme několik typů pórovitosti:

- a) *Pórovitost celkovou, neboli absolutní (úplná) P_c* – poměr objemu všech pórů v horninovém vzorku k celkovému objemu vzorku horniny (viz obr. 1) (Bujok 1989).

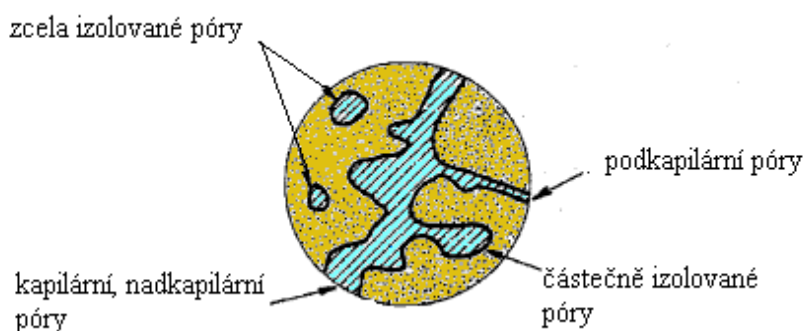
$$P_c = \frac{V_{pc}}{V_{hc}} \quad \text{Rovnice 1}$$

kde

P_c je celková pórovitost (-);

V_{pc} je celkový objem pórů ve vzorku (m^3);

V_{hc} je celkový objem vzorku (m^3).



Obrázek 1: celková pórovitost (Bujok 1989, upraveno)

- b) *Pórovitost otevřenou, neboli komunikující P_o* – poměr všech vzájemně komunikujících pórů k celkovému objemu vzorku horniny (viz obr. 2) (Bujok 1989).

$$P_o = \frac{V_{po}}{V_{hc}} \quad \text{Rovnice 2}$$

kde

P_o je otevřená pórovitost (-);

V_{po} je objem všech navzájem komunikujících pórů ve vzorku (m^3);

V_{hc} je objem vzorku včetně pórů (m^3).

Otevřená pórovitost P_o je rovna celkové pórovitosti P_c bez všech izolovaných (nekomunikujících pórů) (Bujok 1989).



Obrázek 2: otevřená pórovitost (Bujok 1989, upraveno)

- c) *Pórovitost účinnou neboli efektivní P_u* – jedná se o hydraulický parametr, který charakterizuje geohydrodynamické systémy. Je rovna pórovitosti otevřené P_o bez podkapilárních, částečně izolovaných pórů (viz obr. 3) (Bujok 1989)



Obrázek 3: účinná pórovitost (Bujok 1989, upraveno)

2.1.2 Smáčivost

Vlastnost tekutiny přilnout k povrchu pevné části vzorku horniny (Bártková, Klusoň 2014). Smáčivost je základním pravidlem pro rozbor podmínek filtrace rozdílu mezi tekutinou, která horninu smáčí a tekutinou která ji nesmáčí. Při proudění kapaliny a plynu je smáčivou fází kapalina a při proudění dvou nemísitelných kapalin (voda a ropa) bývá smáčivou fází také voda, což platí i pro třífázovou směs tekutin. Pro smáčivou fází existuje základní podobnost křivek propustnosti v různých vícefázových systémech a v různých propustných prostředích. Hlavními znaky této podobnosti jsou (Bujok 1989):

- Rychlý pokles propustnosti pro smáčivou fází, když začne klesat pod 100 % nasycení.
- Úplná ztráta propustnosti pro smáčivou fází, když její obsah klesne na 15 – 30 %.

2.1.3 Permeabilita neboli propustnost

Schopnost horninového prostředí propouštět tekutiny. Číselně ji lze vyjádřit koeficientem propustnosti k (dále jen propustnost) (m^2 , D - darcy) (Bujok 1989), jenž nezávisí na vlastnostech proudící tekutiny (Grmela 2007). Lze ji klasifikovat jako primární, ta vzniká nahromaděním sedimentů a sekundární, která vzniká obměnou základní hmoty například rozpouštěním nebo zpevňováním hornin (Tiab et Donaldson 2004).

Míru propustnosti pórovitého prostředí pro vodu o dané kinematické viskozitě je možné také charakterizovat koeficientem hydraulické vodivosti, neboli koeficientem filtrace K . Číselně je roven filtrační rychlosti při jednotkovém piezometrickém gradientu. Koeficient hydraulické vodivosti má rozměr rychlosti ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (Bujok 1989).

Pro vztah mezi koeficientem hydraulické vodivosti a propustnosti platí (Grmela 2007):

$$K = k \cdot \frac{\gamma}{\mu} \quad \text{Rovnice 3}$$

kde

K je koeficient hydraulické vodivosti ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

k je propustnost (m^2);

γ je měrná tíže tekutiny ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$);

μ je dynamická viskozita ($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$).

Horniny se podle propustnosti dělí na propustné, kde koeficient hydraulické vodivosti K je $\text{n} \cdot 10^{-2}$ až $\text{n} \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. A horniny nepropustné, kde koeficient hydraulické vodivosti je menší než $\text{n} \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Propustné horniny bývají většinou kolektory a nepropustné jsou velmi často izolátory (Grmela 2007). Pro kritérium rozlišení kolektoru a izolátoru je obvykle brána difference (rozlišnost) 1-1,5 řádu hodnoty propustnosti (Bláha et al. 2010).

V horninovém prostředí označovaném jako kolektor je propustnost natolik větší vůči přilehlému okolí, že se jím gravitační voda pohybuje mnohem snadněji za stejných hydraulických podmínek (Grmela 2007).

V horninovém prostředí označovaném jako izolátor je propustnost natolik menší vůči přilehlému okolí, že se jim gravitační voda pohybuje mnohem nesnadněji za stejných hydraulických podmínek (*Grmela 2007*).

Propustnost hornin lze klasifikovat podle tabulky:

Tabulka 1: Klasifikace propustnosti hornin (*Jetel 1973 in Bujok 1989*)

propustnost k (m^2)	Označení hornin podle stupně propustnosti	Koeficient hydraulické vodivosti K ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
	Velmi silně propustné	
$1 \cdot 10^{-9}$	Silně propustné	$1 \cdot 10^{-2}$
$1 \cdot 10^{-10}$	Dosti silně propustné	$1 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^{-11}$	Mírně propustné	$1 \cdot 10^{-4}$
$1 \cdot 10^{-12}$	Dosti slabě propustné	$1 \cdot 10^{-5}$
$1 \cdot 10^{-13}$	Slabě propustné	$1 \cdot 10^{-6}$
$1 \cdot 10^{-14}$	Velmi slabě propustné	$1 \cdot 10^{-7}$
$1 \cdot 10^{-15}$	Nepatrně propustné	$1 \cdot 10^{-8}$

Pro zjišťování propustnosti se vychází z Darcyho zákona (*Bujok 1989*), který je formulován pro čistou vodu o teplotě 20°C (*Kobr et al. 1997*):

$$Q = K \cdot I \cdot F$$

Rovnice 4

kde

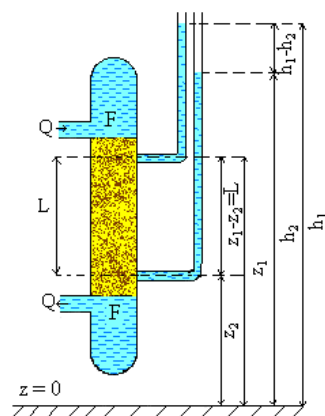
Q je průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

I je bezrozměrný hydraulický gradient (-);

F je průtočná plocha vzorku (m^2);

K je koeficient hydraulické vodivosti ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Pokusy pro stanovení propustnosti byly prováděny H. P. G. Darcym pro přímkově rovnoběžný filtrační tok při svislém proudění ve směru tížnice (viz obr. 4).



Obrázek 4: Schéma filtračního zařízení podle H. Darcyho (Bujok 1989, upraveno)

Pro splnění Darcyho zákona, musí platit tyto podmínky (*Vinci Technologies SA 2011*):

- 1) Vzorek jádra je z 100% nasycený jedinou tekutinou.
- 2) Dynamická viskozita proudící tekutiny je konstantní.
- 3) Kapalina, která proudí daným horninovým prostředím, je téměř nestlačitelná.
- 4) Proudění tekutiny je ustálené v laminárním režimu.
- 5) Průtok kapaliny porézním médiem je ve viskózním režimu (hodnota průtoku je dostatečně nízká, takže je přímo úměrná rozdílu tlaku nebo hydraulickému gradientu);
- 6) Kapalina, která proudí horninou, nevytváří chemické reakce s horninovým vzorkem.

Darcyho zákon je v platnosti dokud se nepřekročí kritická hodnota Reynoldsova čísla Re , která popisuje režim proudění, které přechází z laminárního režimu do předchozího režimu a následným zvyšováním Re až k turbulentnímu proudění. Reynoldsovo číslo udává poměr mezi viskózními silami a inertními silami a lze ho vyjádřit takto (*Vinci Technologies SA 2011*):

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_{50}}{\mu} \quad \text{Rovnice 5}$$

kde

ρ je hustota kapaliny ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$);

v je fiktivní rychlost ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

d_{50} je medián velikosti horninových zrn (mm);

μ je dynamická viskozita ($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$).

Velikost propustnosti 1 Darcy – D má prostředí, které propouští čistou vodu o teplotě 20°C průřezem o velikosti 1 cm² za 1 s. Pro převod na jednotku m² platí vztah (Kobr et al.1997):

$$1D = 0,987 \cdot 10^{-12} m^2.$$

Platí, že čím menší je nasycenost pórů tekutinou v hornině, tím menší je i propustnost pro danou tekutinu (Bujok 1989).

2.2 Typy propustnosti

- a) *Celková neboli absolutní propustnost* k_c – je charakteristikou propustnosti při nasycení kolektoru pouze jednou fází, která je v interakci s prostředím kolektoru. Jednotkou pro celkovou propustnost je m² (Bujok 1989). Celková propustnost se vypočte podle vzorce:

$$k_c = \frac{Q}{\Delta p} \cdot \frac{\mu}{F} \cdot L$$

Rovnice 6

kde

k_c je celková, absolutní propustnost (m²);

Q je průtok (m³·s⁻¹);

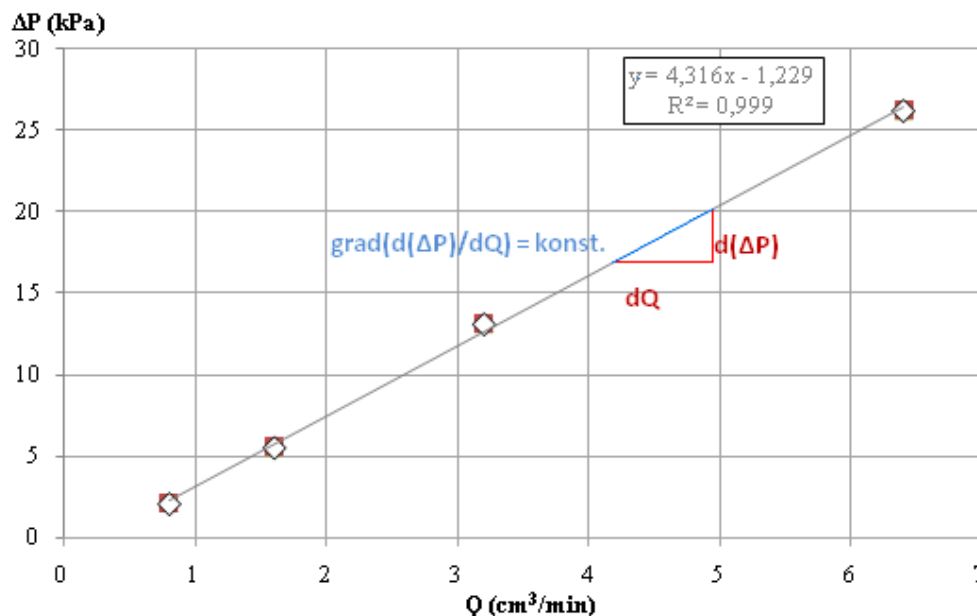
Δp je rozdíl tlaku na vstupu a tlaku na výstupu (Pa);

μ je dynamická viskozita (N·s·m⁻²);

F je průtočná plocha vzorku (m²);

L je délka vzorku (m).

$\frac{Q}{\Delta p}$ je lineární a u celkové propustnosti konstantní. Více je patrné z následujícího grafu 1, kde je vidět závislost rozdílu vstupního a výstupního tlaku na průtoku.



Graf 1: závislost rozdílu vstupního a výstupního tlaku na průtoku u celkové propustnosti

b) *Efektivní propustnost* k_f – je charakteristikou pórovitého prostředí propouštět svými póry jednu určitou tekutinu při daném stupni nasycení pórovitého prostředí několika tekutinami. To znamená, že kolektor obsahuje několik tekutin vodu, plyn, ropu a při určitém průtoku a tlakovém spádu bude tolik hodnot efektivní propustnosti kolik je v kolektoru různých tekutin. Tyto hodnoty jsou závislé na celkové propustnosti k_c a na stupni nasycení dané tekutiny v pórech. Jednotkou pro koeficient efektivní propustnosti je také m^2 , jako u celkové propustnosti (Bujok 1989). Vzorec pro výpočet efektivní propustnosti je shodný se vzorcem pro absolutní propustnost (viz Rovnice 6) s rozdílem že $\frac{Q}{\Delta p}$ není směrnici trendu.

c) *Poměrná, relativní propustnost* k_p – je dána poměrem efektivní propustnosti k_f a celkové propustnosti k_c . Jednotka pro hodnotu relativní propustnosti je bezrozměrná a nabývá hodnot od 0 do 1 (Bujok 1989).

$$k_p = \frac{k_f}{k_c}$$

Rovnice 7

kde

k_p je poměrná, relativní propustnost (-);

k_f je efektivní propustnost (m^2);

k_c je celková propustnost (m^2).

2.3 Permeabilita v průlinách, puklinách a dutinách

Jak už bylo zmíněno výše, existuje několik typů volných prostor v horninovém prostředí, které jsou schopny navzájem hydraulicky komunikovat. Tyto prostory se liší geologickým původem a hydraulickými vlastnostmi (Grmela 2007). Jedná se o průliny, pukliny, dutiny. Permeabilita v těchto prostorech se pak od sebe liší.

Průlinová propustnost – je ovlivněna přítomností klastických, nesoudružných sedimentů, ale i klastických zpevněných sedimentů.

Puklinová propustnost – je ovlivněna mírou křehkého porušení v horninovém prostředí. Voda se zde pohybuje po puklinách (Bokr 1999) a míra propustnosti puklin je závislá především na četnosti puklin, na jejich rozevření, tj. vzdálenosti protilehlých stěn puklin a na drsnosti stěn (Gehlin et Hosan 2003).

Propustnost v dutinách karbonátů – je ovlivněna postupným rozpouštěním horniny přítomností kyselých vod (Tiab et Donaldson 2004)

2.4 Odhady permeability

Informace o permeabilitě mohou být odhadnuty nebo zjištěny na základě výsledků analýz vrtných jader, z měření ve vrtech a interpretací dat o produktivnosti vrtů. K odhadům permeability na základě znalosti efektivní pórovitosti horniny je možné použít Carman-Kozeny model, který je stále používán a modifikován (viz např.: Krauss et Mays 2014). Tímto modelem lze vyjádřit permeabilitu jako funkci efektivní pórovitosti, turtuozity neboli křivolakosti toku, a specifické plochy povrchu, které bývají odhadnuty minimálně na základě těchto tří metod tj. plynová absorpční metoda, petrografická analýza obrazu a nukleární magnetická resonance. Pro představu může posloužit porézní médium jako svazek turtuózních kapilárních trásní, které mají stejný poloměr. K základnímu vyjádření tohoto modelu je zapotřebí znát Darcyho zákon, o kterém byla zmínka již výše a Poiseillův zákon pro viskozní proudění kapaliny q v kapilárních trásnách (Tiab et Donaldson 2004):

$$q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot \mu \cdot L_t}$$

kde

Rovnice 8

q je proudění kapaliny v kapilárních třásních ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

R je poloměr kapilárních třásní (cm);

Δp je rozdíl tlaku na vstupu a tlaku na výstupu ($\text{N} \cdot \text{cm}^{-2}$);

L_r je délka kapilárních třásní (cm);

μ je dynamická viskozita (p);

(1 p = 0,1 $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$).

Výsledný tvar modelu Carman-Kozeny se pak dostane spojením zákonů Darcyho a Poiseuillova (*Nooruddin et Hossain 2011 in Halatová 2013*):

$$k = \frac{\varphi}{8 \cdot T} \cdot r^2$$

Rovnice 9

kde

k je propustnost (μm^2);

T je turtuozita, neboli křivolakost toku (-);

P_u je efektivní pórovitost (-);

r je průměr kapilárních třásní (μm^2).

2.4.1 Empirické vzorce

Pro odhad propustnosti se u klastických nezpevněných sedimentů používají empirické vzorce, které slouží k výpočtu koeficientu hydraulické vodivosti K . Jedná se o vzorce podle A. Hazena, J. Krügera, E. Seelheima atd. Tyto vzorce vystihují granulometrické složení – velikost a propojenost pórových prostor a jejich vztah k propustnosti (*Homola et Grmela 1991*):

Vzorec A. Hazena se vypočte:

$$K = c \cdot d_e^2 \cdot (0,7 + 0,03 \cdot t) \cdot 10^{-5}$$

Rovnice 10

Kde

K je koeficient hydraulické vodivosti ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

t je teplota vody ($^{\circ}\text{C}$)

d_e je efektivní průměr zrn (mm)

c je součinitel rovnoměrnosti zrnitosti a závisí na homogenitě a pórovitosti materiálu a vypočte se podle vzorce O. K. Lange:

$$c = 400 + 40 \cdot (P_{dr} - 26) \quad \text{Rovnice 11}$$

kde

P_{dr} je koeficient drenážní pórovitosti v %.

Vzorec se používá pro písky a štěrky, kde d_e je od 0,1 do 3 mm a koeficient stejnorodosti je menší než 5. Tento koeficient se vypočte:

$$k_s = \frac{d_{60}}{d_e} \quad \text{Rovnice 12}$$

kde

d_{60} je průměr zrn odpovídající 60 % četnosti (mm) (zjištěný z granulometrické křivky)

d_e je efektivní průměr zrn (mm)

Vzorec J. Krügera se používá pro středně zrnité písky, prachovité až hlinité písky, jemnozrnné písčité zeminy a vypočte se:

$$K = 373 \cdot \frac{P_{dr}}{(1 - P_{dr})^2} \cdot d_e^2 \cdot 10^{-3} \quad \text{Rovnice 13}$$

kde

K je koeficient hydraulické vodivosti ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

P_{dr} je koeficient drenážní pórovitosti (%)

d_e je efektivní průměr zrn (mm)

Vzorec je stanovený pro teplotu 10 °C.

Vzorec E. Seelheima se vypočte:

$$K = 3,57 \cdot d_{50}^2 \cdot 10^{-3} \quad \text{Rovnice 14}$$

kde

K je koeficient hydraulické vodivosti ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

d_{50} je medián velikosti horninových zrn (mm).

Vzorec se používá pro posouzení nezpevněných sedimentů s $d_{50} = \text{cca } 0,1 \text{ mm}$ a pro vody s velmi nízkou mineralizací; výsledné hodnoty K bývají převážně vyšší než ve skutečnosti. Také tento vzorec je stanoven pro teplotu 10°C .

2.5 Permeabilita pro kapalinu a plyn

Propustnost je různá jak pro kapalinu, tak pro plyn, neboť plyn je stlačitelný, zatímco kapalina oproti plynu jen minimálně. Plyn proudí směrem k výstupnímu konci vzorku jádra, jeho tlak klesá, plyn expanduje a tak se zvyšuje jeho rychlost (*Vinci Technologies SA 2010a*).

2.5.1 Měření permeability pro kapalinu

U měření permeability neboli propustnosti pro kapalinu je výpočet odvozen z Darcyho zákona, který je při ustáleném stavu pro laminární proudění vyjádřen podle rovnice 6:

Propustnost média jedné kapaliny je ovlivněná přítomností chemických nebo fyzikálních reakcí mezi kapalinou a elektrolytickými účinky. Například účinky mezi jíly a ionty vody. Pro vzorek obsahující jíl může být spíše použita solanka než čistá voda. (*Vinci Technologies SA 2010b*)

2.5.2 Měření permeability pro plyn

Permeabilita neboli propustnost plynů je pro většinu hornin od $0,001 \mu\text{m}^2$ do $5000 \mu\text{m}^2$ (*Kobr et al. 1997*). U měření propustnosti pro plyn je výpočet také odvozen z kombinace Boyelova a Darcyho zákona, neboť plyn má různý objem za různého tlaku – expanduje. Tento zákon může být při ustáleném laminárním proudění vyjádřen jako (*Vinci Technologies SA 2010a*):

$$k_{\text{plyn}} = \frac{2 \cdot \mu \cdot Z \cdot T \cdot p_b \cdot L \cdot Q}{F \cdot T_b \cdot (p_1^2 - p_2^2)}$$

Rovnice 15

kde

k_{plyn} je propustnost plynu (D);

μ je dynamická viskozita (Cp);

Z je střední koeficient stlačitelnosti plynu (Atm);

T je průměrná teplota proudícího plynu ($^{\circ}\text{C}$);

p_b je atmosférický tlak (Atm);

L je délka vzorku (cm);

Q je průtok ($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

F je průtočná plocha vzorku (cm^2);

T_b je základní teplota ($^{\circ}\text{C}$);

p_1, p_2 je tlak na vstupu a tlak na výstupu (Atm)

($1 \text{ D} = 0,987 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$; $1 \text{ Cp} = 0,001 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$; $1 \text{ Atm} = 101\,325 \text{ Pa}$).

Rovnice je používána pro výpočet základní propustnosti dusíku, v rámci laminárních proudění. Uvedená je tak v normě API RP 27 pro ideální horizontální laminární proudění plynu v ustáleném stavu izotermickém (*Vinci Technologies SA 2010a*).

Jestliže není použitý žádný protitlak pak tlak na vstupu p_1

$$p_1 = \frac{\Delta p}{14,695949} + p_b \quad \text{Rovnice 16}$$

a tlak na výstupu

$$p_2 = p_b \quad \text{Rovnice 17}$$

Hodnota rozdílu tlaku na vstupu a tlaku na výstupu (tj. tlakového spádu) Δp je tak přesnější jak p_1 . Jestliže se použije protitlak pak

$$p_1 = \frac{p_1}{14,695949} + p_b \quad \text{Rovnice 18}$$

$$p_2 = \frac{p_1 - \Delta p}{14,695949} + p_b \quad \text{Rovnice 19}$$

Průměrný tlak je pak

$$p_m = \frac{p_1 + p_2}{2} p_b \quad \text{Rovnice 20}$$

kde

p_1 je tlak na vstupu (Atm);

Δp je rozdíl tlaku na vstupu a tlaku na výstupu (Atm);

p_b je atmosférický tlak (Atm);

p_2 je tlak na výstupu (Atm);

($1D=0,987 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, $1 \text{ Atm} = 101\,325 \text{ Pa}$, $1 \text{ Cp}=0,001 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$);

p_1 a p_2 jsou spočítány z rovnic 16 a 19 (*Vinci Technologies SA 2010a*).

Podle Klinkenberga vyhodnocení naměřených hodnot propustnosti plynů silně nezávisí na použitém tlakovém gradientu. Tato skutečnost byla vysvětlena skluzem molekul plynu na rozhraní mezi pevnou látkou a plynem. Propustnost pro plyny je vždy vyšší než pro kapaliny a tato Klinkenbergova oprava měření pro plyny je používána aby byla srovnatelná s měřením propustností pro kapaliny (*Bujok 1989*). K vyhodnocení propustnosti se pak použije vztah (*Vinci Technologies SA 2011*):

$$k_{\text{plyn}} = k_{\text{kap.}} \cdot \left(1 + \frac{b}{p_m}\right), \quad \text{Rovnice 21}$$

kde

k_{plyn} je propustnost pro plyn (m^2);

$k_{\text{kap.}}$ je propustnost pro kapalinu (m^2);

b je součinitel skluzu plynu (Pa);

p_m je průměrný tlak (Pa).

Vliv efektu skluzu se tak snižuje se zvyšující se propustností horniny a narůstá součinitel skluzu plynu b . Správnou hodnotu propustnosti lze potom vyjádřit graficky podle rovnice 15. Metodu však lze použít jen v případě proudění, které se řídí lineárním zákonem filtrace (*Bujok 1989*).

3 Laboratorní stanovení permeability daných vzorků izolačních směsí

K vyplnění starých důlních děl se používají cemento-popílkové izolační směsi. Některé cemento-popílkové směsi jsou vhodné k vyplnění nevyužívaných podzemních prostor a inženýrských sítí, jiné směsi jsou vhodné k likvidaci vrtů. Tyto cemento-popílkové směsi jsou složeny z popílků z tepláren a elektráren o průměrné měrné hmotnosti 2098 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a průměrné objemové hmotnosti 1868 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), cementu a ostřiva, které představují např.: odpadní slévárenské písky o průměrné měrné hmotnosti 2741 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a průměrné objemové hmotnosti 2217 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), a křemenné písky (*Slivka et al 2013*). Cemento-popílkové směsi se od sebe liší množstvím obsahu popílků, cementu a ostřiva.

3.1 Složení cemento-popílkové směsi

Testovaná cemento-popílková směs je složená z elektrárenských popílků, cementu a ostřiva tj. křemitého písku. Podíl pojiva této směsi činí 60 %. Z toho připadá 50 % na množství obsahu popílků a 10 % na množství cementu. Zbýlých 40 % v této cemento-popílkové směsi připadá na ostřivo. Vodní součinitel směsi tj. podíl pojiva a ostřiva má hodnotu 1. (*Slivka et al 2013*).

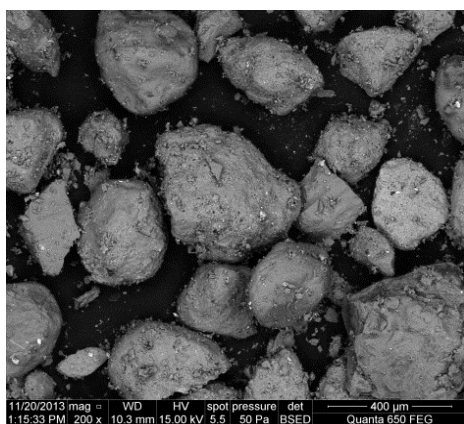
Použitý popílek obsahuje dle analýzy:

Oxid křemičitý 46,3 % hmotnosti, oxid hlinitý 18,7% hmotnosti, oxid železitý 5,52 % hmotnosti, oxid draselný 2,61 % hmotnosti, oxid vápenatý 2,23 % hmotnosti, oxid hořečnatý 1,4 % hmotnosti, oxid titaničitý 0,75 % hmotnosti, oxid fosforečný 0,12 % hmotnosti, oxid manganatý 0,07 % hmotnosti, síru 0,06 % hmotnosti a chlor 0,02 % hmotnosti. Dále dle analýzy obsahuje tento popílek baryum 735 mg/kg, zinek 274 mg/kg, stroncium 197 mg/kg, zirkonium 131 mg/kg, vanad 127 mg/kg, chrom 111 mg/kg, cerium 101 mg/kg, rubidium 83 mg /kg, nikl 58 mg/kg a lanthan 58 mg/kg.

Tato analýza byla provedena v laboratořích Petrografické analýzy hornin VŠB – TUO. Jako standard byl použit chemicky čistý oxid zinečnatý (*Slivka et al 2013*).

Použitý křemitý písek obsahuje dle analýzy:

Oxid křemičitý 59,1 % hmotnosti, oxid hlinitý 3,9 % hmotnosti, oxid železitý 2,03 % hmotnosti, oxid titaničitý 0,41 % hmotnosti, oxid hořečnatý 0,39 % hmotnosti, oxid draselný 0,37 % hmotnosti, oxid vápenatý 0,25 % hmotnosti, oxid fosforečný 0,06 % hmotnosti, síru 0,04 % hmotnosti, chlor 0,04 % hmotnosti a oxid manganatý 0,02 % hmotnosti. Dále dle analýzy obsahuje tento písek chrom 262 mg/kg, baryum 99 mg/kg, zinek 93 mg/kg, cerium 69 mg/kg a vanad 63 mg/kg. Na obrázku 5 je snímek písku, který je použitý ve směsi pořízený pomocí mikroskopu.



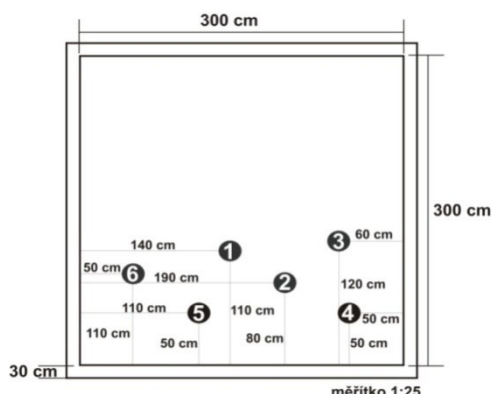
Obrázek 5: Křemitý písek použitý ve směsi (Slivka et al 2013)

Tato analýza byla provedena v laboratořích Petrografické analýzy hornin VŠB – TUO. Jako standard byl použit chemicky čistý oxid zinečnatý (Slivka et al 2013).

3.2 Testování cemento-popílkové směsi v terénu

Pro účel testování této cemento-popílkové izolační směsi byla vybudována pokusná šachtice (komín) na lokalitě výsypky v Prostřední Suché. Směs zde byla odlita do pokusného komínu o rozměrech 3 x 3 x 10 m. Zaplavení komínu touto směsí proběhlo v červnu 2013. Od dne vyplnění komínu bylo provedeno šest jádrových vrtů do hloubky deseti metrů a to v intervalu 14, 28, 60, 90, 120 a 180 dní. Umístění vrtů v pokusné šachtici je zobrazeno na obrázku 6. Vrtý byly odvrtnuty malou vrtnou soupravou MVS-1. Všechny jádrové vrty jsou v první polovině půdorysné plochy pokusné šachtice (komínu), a to z důvodů dalších průzkumných prací v in-situ, zejména zásekové zkoušky. K dalšímu

výzkumu jsou téměř 3/5 objemu komínu, které nejsou ovlivněny mechanickým porušením po jádrovém vrtání (Bujok *et al* 2013).



Obrázek 6: Schéma situování vrtů

Zaplavení opěrné konstrukce komínu, bylo provedeno pomocí těžké techniky, domíchávače a stavebního stroje VOLVO. Během 7 hodin se komín o objemu 91 m³ vyplnil celý. Potom se ještě dva dny dolévala směs, z důvodu vytlačení vody z komína (Bujok *et al* 2013)

Odběr jádra přes celou mocnost výplně byl proveden pomocí jádrováku (obr. 7) délky 0,4 m a průměru 0,1 m. Tento jádrovák měl speciálně upravenou vrtnou korunku s přebroušenými vysazenými zuby. Aby nedocházelo k rozbředání jádra vrtných výplachem, bylo vrtání prováděno velmi pomalým regulovaným postupem na sucho. Odvrtaná jádra byla odvezena do laboratoří Hornicko-geologické fakulty, kde se vzorky popsaly, nafotily a připravily k dalšímu výzkumu (stanovení pevnosti v prostém tlaku a stanovení permeability neboli propustnosti) (Bujok *et al* 2013).



Obrázek 7: Jádrovák před vyprázdněním (Bujok *et al* 2013)

3.3 Testování cemento-popílkové směsi laboratorně

Z odvrtaných jader, z pokusné šachtice (komínu) na lokalitě výsypky v Prostřední Suché, se odvrtalo kolmo na jednotlivá jádra pomocí vrtného přístroje Hilty (obr. 8) několik jader malého průměru a malé délky. Pro odlišnost od jader odvrtaných z šachtice budu tyto malé jádra nazývat jadérka, případně vzorek (ang. termín core plug). Průměr jednotlivých jadérek je 1,5“ (3,81 cm). Odvrtaná a upravená jadérka byla použita pro laboratorní stanovení permeability (obr. 10, 11, 12). V rámci této bakalářské práce jsou použita jadérka odvrtaná z intervalu 5. až 7. m v pokusné šachtici (komínu). Po odvrtání, byla jadérka upravená do tvaru válce a připravená k laboratornímu stanovení permeability.



Obrázek 8: Vrtný přístroj Hilty (Bujok et al 2013)

Laboratorní měření propustnosti pro plyn (dusík) dané izolační cemento-popílkové směsi proběhlo na instrukčním permeamtru (GasPerm firmy Vinci Technologies, Francie) (obr. 9) umístěném v Laboratoři stimulace vrtů a ložisek uhlovodíku na Hornicko - geologické fakultě. Toto zařízení je schopné pracovat s upevňovacím tlakem jádra (tj. boční stlačení) do 400 psi (2,758 MPa) a vstupní tlak plynu až 100 psi (0,689 MPa). Permeametr, na kterém měření probíhalo je určeno k rychlým analýzám propustnosti na vrtných jadérkách. Pro samostatný test bylo potřeba, aby jadérko mělo průměr 1,5“ (3,81 cm). Výstupní tlak odpovídá atmosférickému tlaku. Ke snímání průtoku plynu a tlakového spádu přes testovaný vzorek pro stanovení přesné hodnoty efektivní permeability k (mD) ($1 \text{ mD} = 0,987 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$) je užíván objemový průtokoměr s rozsahem 5 – 500 cm^3/min . Měření probíhalo do stavu, dokud byly splněny podmínky Darcyho zákona pro laminární

proudění. Ke kvantitativnímu posouzení byla použita jednotka D – darcy, která není v soustavě SI jednotek. Pro převod na m^2 platí $1\text{D} = 0,987 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$. (Bujok et al 2013).



Obrázek 9: Permeometr (GasPerm firmy Vinci, Francie)



Obrázek 10: Vzorek cemento-popílkové směsi

3.3.1 Postup měření

1. U předem upraveného jádérka se změřila pomocí posuvného měřidla jeho délka a jeho průměr;
2. Změřené jádérko se vložilo do tzv. zásobníku instrukčního permeamtru pro měření propustnosti plynu (GasPerm firmy Vinci Technologies, Francie);
3. Pomocí dvou bajonetů se zde jádérko upevnilo;
4. Nastavil se tlak bočního stlačení na přibližnou hodnotu 100 (0,689 MPa) psi a 300 psi (2,068 MPa);
5. Odečetl se tlak na výstupu (u tohoto zařízení je tento tlak shodný s atmosférickým);
6. Postupně se zvyšoval průtok plynu (dusíku), tak aby byly splněny podmínky Darcyho zákona pro laminární proudění a odečítal se tlak na vstupu;
7. Všechny naměřené hodnoty se postupně zapisovaly do tabulek v excelu.

4 Interpretace a analýza naměřených dat

Po naměření efektivní propustnosti k_f na instrukčního permeamtru pro měření propustnosti plynu (GasPerm firmy Vinci Technologies, Francie) podle postupu uvedeném na konci 3. kapitoly bylo nutné převést jednotlivé veličiny na odpovídající jednotky aby bylo možné provést výpočet celkové propustnosti dle rovnice 22. Délka jádérka L z mm na cm, průtok Q z $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ na $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, u vstupního a výstupního tlaku byl proveden převod z jednotky psi na Atm (1 psi = 6 895 Pa, 1 Atm = 101 325 Pa). Dále bylo zapotřebí vypočítat průtočnou plochu jádérka F z naměřeného průměru vzorku d . Podle naměřené zapsané teploty se zjistila dynamická viskozita μ v jednotkách Cp (1 Cp = 0,001 N·s·m⁻²). K převodu na správné jednotky posloužily webové stránky (*Jednotky.cz*) a pro vyhledání hodnoty pro dynamickou viskozitu byly použity webové stránky (*Gas Viscosity Calculator 2014*).

Pro výpočet celkové permeability k_c byla použita následující rovnice 22, která je odvozená z rovnice 15 s tím že platí Z , T a T_b je rovno 1 (*Vinci technologies SA 2010a*):

$$k_c = \frac{Q \cdot \mu \cdot L \cdot p_b}{F \cdot \Delta p \cdot p_m} \quad \text{Rovnice 22}$$

kde

k_c je celková propustnost (D);

Q je průtok ($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

μ je dynamická viskozita (Cp);

L je délka vzorku (cm);

p_b je atmosférický tlak (Atm) = p_2 tlak na výstupu (Atm);

F je průtočná plocha vzorku (cm^2);

Δp je rozdíl tlaku na vstupu a tlaku na výstupu (Atm);

p_m je průměrný tlak (Atm).

(1D = $0,987 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$; 1 Cp = $0,001 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$, 1 Atm = 101 325 Pa)

Pro výpočet hodnoty $\frac{Q_b}{\Delta p \cdot p_m}$, neboť tato hodnota je u celkové propustnosti konstantní, posloužila funkce SLOPE v počítačovém programu Microsoft Office Excel 2007. Dynamická viskozita dusíku byla přibližně $0,017721 \text{ Cp}$ ($1,77 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$).

4.1 Hodnocení klasifikace propustnosti

Pro vyhodnocení propustnosti jednotlivých jader cemento-popílkové směsi, kterou byla vylitá pokusná šachtice na lokalitě výsypky v Prostřední Suché v roce 2013, posloužila tabulka 1 uvedená v 2. kapitole této práce. Jednalo se o 12 jader odvrtných z 6 jádrových vrtů z intervalu 5. – 7. m pokusného komínu. Vyhodnoceno, ale bylo pouze 10 vzorků směsi neboť z prvního jádrového vrtu odvrtného 14 dní po odlití komínu a následného odvrtání jednotlivých jader neexistují reálně naměřené hodnoty tlaku na výstupu, které by šlo vhodně aplikovat. Jednotlivé naměřené hodnoty převedené na správný násobek jednotek, a dále převedené jednotky na SI jednotky (tlaků, propustností) jsou uvedené v tabulkách 2 – 9. Naměřené hodnoty mohou být ovlivněny rozmístěním jednotlivých vrtů na pokusném komínu, způsobem vrtání, odvrtáním a následnou úpravou jednotlivých vzorků před měřením. To se projevilo hlavně u vzorku cemento-popílkové směsi odvrtného z vrtného jádra z intervalu 5. – 6. m 120 dní po odlití pokusného komínu (obr. 11). Tento vzorek směsi lze porovnat s jiným např.: s jádérkem odvrtným z 3. vrtného jádra z intervalu 6. – 7. m (obr. 12) nebo se vzorkem na obrázku 10.



Obrázek 11: jadérko z intervalu 5. - 6. m z 5. vrtu



Obrázek 12: jadérko z intervalu 6. - 7. m z 3. vrtu

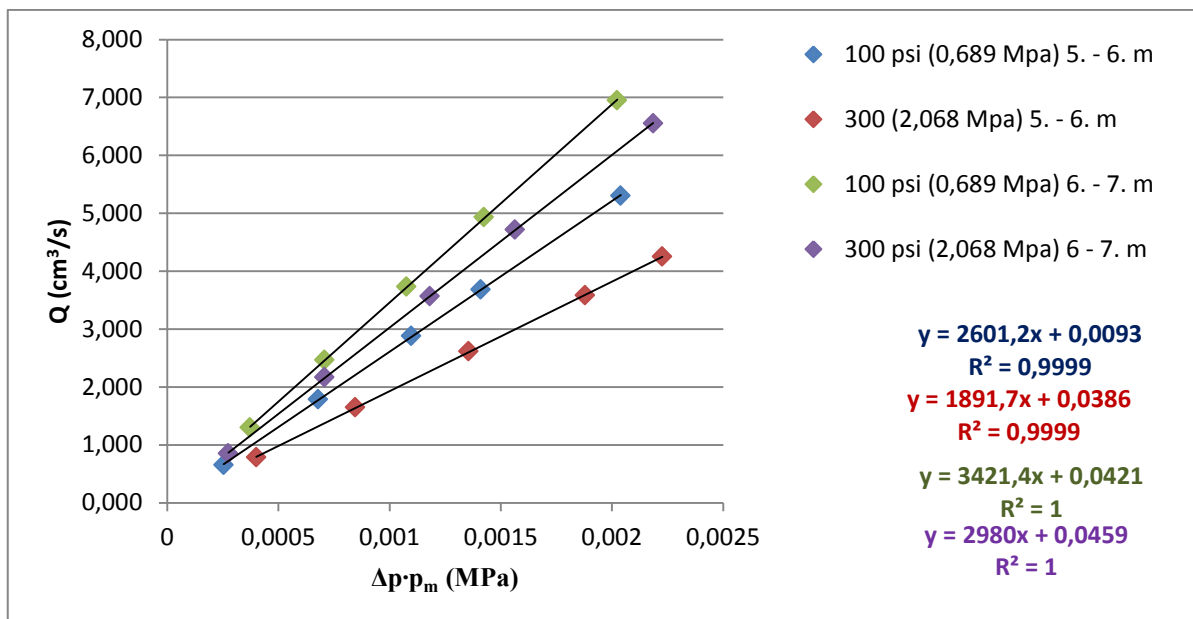
4.1.1 Vyhodnocení veličin jader z jádrového vrtu 28 dní po odlití pokusného komínu

Z tohoto vrtu byly odvrtny dvě jádérka směsi. U jádérka z intervalu 5. – 6. m byla naměřená délka 57,40 mm a průměr 39,05 mm. Tlak bočního stlačení byl nastaven na 100 psi a 310 psi. (0,689 MPa a 2,137 MPa) U jádérka z intervalu 6. – 7. m byla naměřená délka 56,00 mm a průměr 38,80 mm. Tlak bočního stlačení byl nastaven na 100 psi a 280 psi (0,689 MPa a 1,931 MPa). Naměřená teplota byla 27 °C.

Tabulka 2: naměřené hodnoty jadérek z jádra odvrtaného 28 dní po odlití komínu

Interval odvrtaného jadérka	Průtočná plocha jadérka (cm ²)	Délka jadérka (cm)	Tlak na výstupu (MPa)	Tlak bočního stlačení (MPa)	Tlak na vstupu (MPa)	Průtok plynu (cm ³ /s)	Efektivní propustnost (m ²)	Celková propustnost (m ²)
5-6 m	11,977	5,740	0,098	0,689	0,101	0,650	2,4E-13	2,2E-13
5-6 m	11,977	5,740	0,098	0,689	0,105	1,783	2,5E-13	
5-6 m	11,977	5,740	0,098	0,689	0,109	2,883	2,5E-13	
5-6 m	11,977	5,740	0,098	0,689	0,112	3,683	2,5E-13	
5-6 m	11,977	5,740	0,098	0,689	0,117	5,300	2,5E-13	
5-6 m	11,977	5,740	0,098	2,137	0,102	0,783	1,9E-13	1,6E-13
5-6 m	11,977	5,740	0,098	2,137	0,106	1,650	1,8E-13	
5-6 m	11,977	5,740	0,098	2,137	0,111	2,617	1,8E-13	
5-6 m	11,977	5,740	0,098	2,137	0,116	3,583	1,8E-13	
5-6 m	11,977	5,740	0,098	2,137	0,119	4,250	1,8E-13	
6-7 m	11,824	5,600	0,098	0,689	0,102	1,300	3,3E-13	2,8E-13
6-7 m	11,824	5,600	0,098	0,689	0,105	2,467	3,3E-13	
6-7 m	11,824	5,600	0,098	0,689	0,109	3,733	3,3E-13	
6-7 m	11,824	5,600	0,098	0,689	0,112	4,933	3,2E-13	
6-7 m	11,824	5,600	0,098	0,689	0,117	6,950	3,2E-13	
6-7 m	11,824	5,600	0,098	1,931	0,101	0,850	2,9E-13	2,5E-13
6-7 m	11,824	5,600	0,098	1,931	0,105	2,167	2,9E-13	
6-7 m	11,824	5,600	0,098	1,931	0,110	3,567	2,8E-13	
6-7 m	11,824	5,600	0,098	1,931	0,113	4,717	2,8E-13	
6-7 m	11,824	5,600	0,098	1,931	0,118	6,550	2,8E-13	

Podle tabulky 1 odpovídá zde propustnost slabé u obou jadérek při tlaku bočního stlačení 100 psi (0,689 MPa) i 300 psi (2,068 MPa). Na grafu 2 je vidět závislost průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem.



Graf 2: závislosti průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem u jáderka z vrtu odvrtného 28 dní po odlití komínu

4.1.2 Vyhodnocení veličin jáderek z jádrového vrtu 60 dní po odlití pokusného komínu

Z tohoto vrtu byly odvrtny dvě jáderka směsi. U jáderka z intervalu 5. – 6. m byla naměřená délka 59,50 mm a průměr 38,90 mm. Tlak bočního stlačení byl nastaven na 100 psi (0,689 MPa) a 315 psi (2,172 MPa). U jáderka z intervalu 6. – 7. m byla naměřená délka 59,60 mm a průměr 38,90 mm. Tlak bočního stlačení byl nastaven na 100 psi (0,689 MPa) a 290 psi (1,999 MPa). Naměřená teplota byla 20 °C.

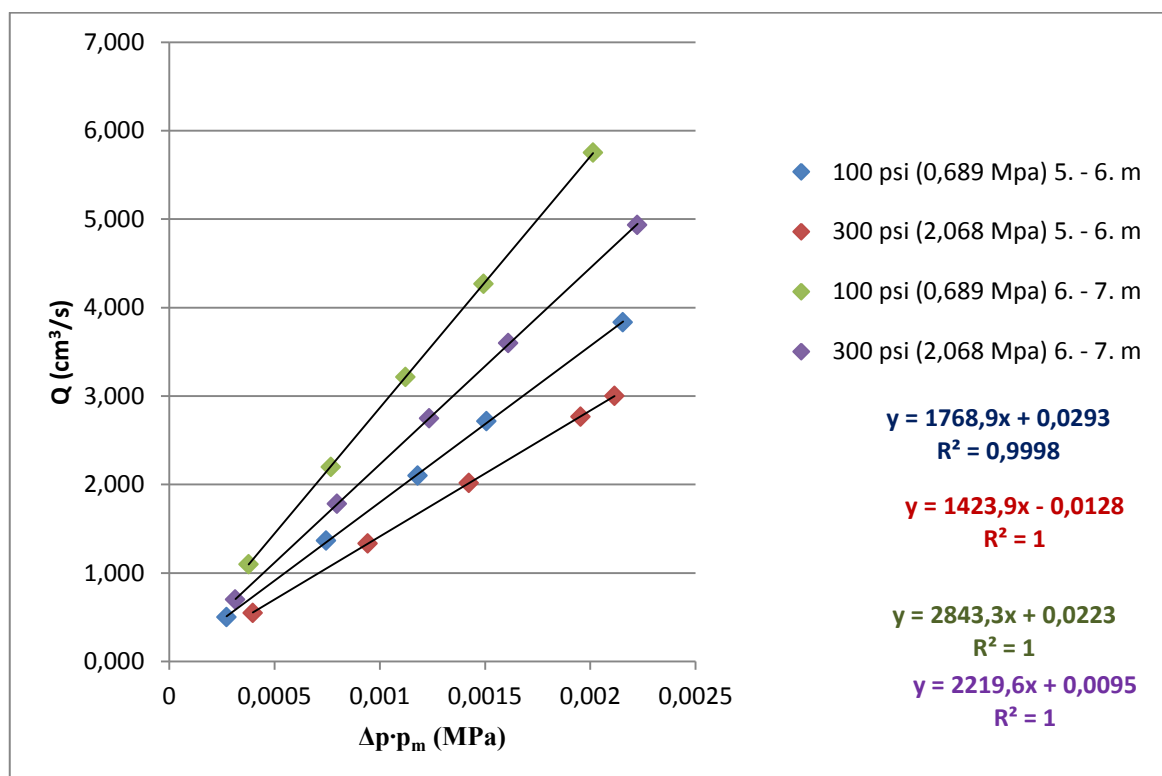
Tabulka 3: naměřené hodnoty jáderek z jádra odvrtného 60 dní po odlití komínu z intervalu 5.- 6. m

Interval odběru jáderka	Průtočná plocha jáderka (cm ²)	Délka jáderka (cm)	Tlak na výstupu (MPa)	Tlak bočního stlačení (MPa)	Tlak na vstupu (MPa)	Průtok plynu (cm ³ /s)	Efektivní propustnost (m ²)	Celková propustnost (m ²)
5-6 m	12,069	5,950	0,097	0,689	0,100	0,500	1,7E-13	1,5E-13
5-6 m	12,069	5,950	0,097	0,689	0,105	1,367	1,7E-13	
5-6 m	12,069	5,950	0,097	0,689	0,109	2,100	1,7E-13	
5-6 m	12,069	5,950	0,097	0,689	0,112	2,717	1,7E-13	
5-6 m	12,069	5,950	0,097	0,689	0,118	3,833	1,7E-13	
5-6 m	12,069	5,950	0,097	2,172	0,101	0,550	1,3E-13	1,2E-13
5-6 m	12,069	5,950	0,097	2,172	0,107	1,333	1,3E-13	
5-6 m	12,069	5,950	0,097	2,172	0,111	2,017	1,3E-13	
5-6 m	12,069	5,950	0,097	2,172	0,116	2,767	1,3E-13	
5-6 m	12,069	5,950	0,097	2,172	0,117	3,000	1,3E-13	

Tabulka 4: naměřené hodnoty jadérek z jádra odvrtaného 60 dní po odlití komínu z intervalu 6.- 7. m

Interval odběru jadérka	Průtočná plocha jadérka (cm ²)	Délka jadérka (cm)	Tlak na výstupu (MPa)	Tlak bočního stlačení (MPa)	Tlak na vstupu (MPa)	Průtok plynu (cm ³ /s)	Efektivní propustnost (m ²)	Celková propustnost (m ²)
6-7 m	12,007	5,260	0,098	0,689	0,101	1,100	2,4E-13	2,2E-13
6-7 m	12,007	5,260	0,098	0,689	0,105	2,200	2,4E-13	
6-7 m	12,007	5,260	0,098	0,689	0,109	3,217	2,4E-13	
6-7 m	12,007	5,260	0,098	0,689	0,112	4,267	2,4E-13	
6-7 m	12,007	5,260	0,098	0,689	0,116	5,750	2,4E-13	
6-7 m	12,007	5,260	0,098	1,999	0,101	0,700	1,9E-13	1,7 E-13
6-7 m	12,007	5,260	0,098	1,999	0,105	1,783	1,9E-13	
6-7 m	12,007	5,260	0,098	1,999	0,110	2,750	1,9E-13	
6-7 m	12,007	5,260	0,098	1,999	0,113	3,600	1,9E-13	
6-7 m	12,007	5,260	0,098	1,999	0,118	4,933	1,8E-13	

Podle tabulky 1 odpovídá zde propustnost slabé u obou jadérek při tlaku bočního stlačení 100 psi (0,689 MPa) i 300 psi (2,068 MPa). Na grafu 3 je vidět závislost průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem.



Graf 3: závislosti průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem u jadérka z vrtu odvrtaného 60 dní po odlití komínu

4.1.3 Vyhodnocení veličin jadérek z jádrového vrtu 90 dní po odlití pokusného komínu

Z tohoto vrtu byly odvrtány dvě jadérka cemento-popílkové směsi. U jadérka z intervalu 5. – 6. m byla naměřená délka 57,00 mm a průměr 38,90 mm. Tlak bočního stlačení byl nastaven na 140 psi (0,965 MPa) a 310 psi (2,137 MPa). U jadérka z intervalu 6. – 7. m byla naměřená délka 59,00 mm a průměr 38,90 mm. Tlak bočního stlačení byl nastaven na 105 psi (0,724 MPa) a 310 psi (2,137 MPa). Naměřená teplota byla 18,5 °C.

Tabulka 5: naměřené hodnoty jadérek z jádra odvrtaného 90 dní po odlití komínu z intervalu 5.- 6. m

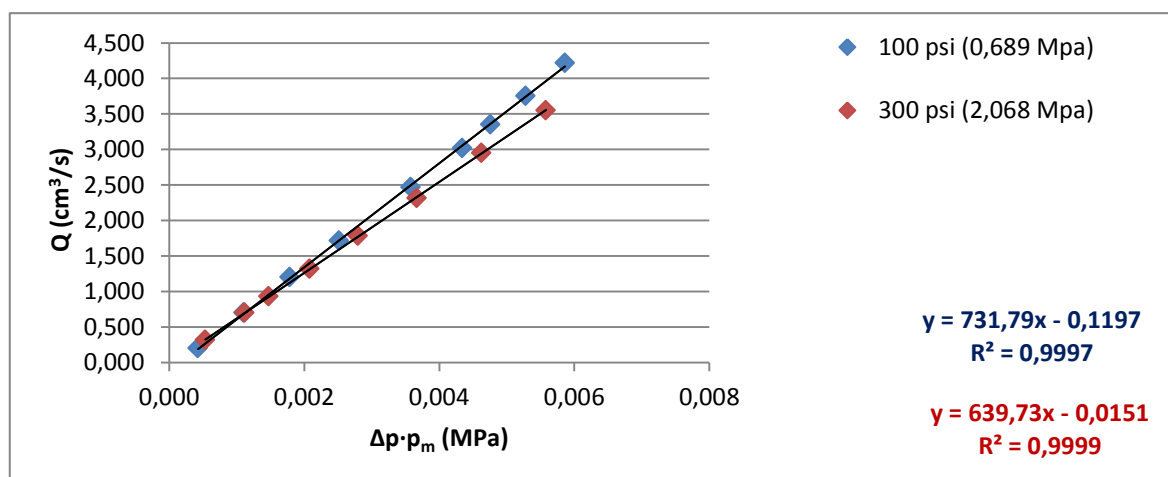
Interval odběru jadérka	Průtočná plocha jadérka (cm ²)	Délka jadérka (cm)	Tlak na výstupu (MPa)	Tlak bočního stlačení (MPa)	Tlak na vstupu (MPa)	Průtok plynu (dusíku) (cm ³ /s)	Efektivní propustnost (m ²)	Celková propustnost (m ²)
5-6 m	11,885	5,700	0,099	0,965	0,103	0,200	4,2E-14	6,2E-14
5-6 m	11,885	5,700	0,099	0,965	0,110	0,700	5,7E-14	
5-6 m	11,885	5,700	0,099	0,965	0,116	1,200	6,1E-14	
5-6 m	11,885	5,700	0,099	0,965	0,122	1,717	6,2E-14	
5-6 m	11,885	5,700	0,099	0,965	0,130	2,467	6,2E-14	
5-6 m	11,885	5,700	0,099	0,965	0,136	3,017	6,3E-14	
5-6 m	11,885	5,700	0,099	0,965	0,139	3,350	6,4E-14	
5-6 m	11,885	5,700	0,099	0,965	0,143	3,750	6,4E-14	
5-6 m	11,885	5,700	0,099	0,965	0,147	4,217	6,5E-14	
5-6 m	11,885	5,700	0,099	2,137	0,105	0,317	5,4E-14	5,3E-14
5-6 m	11,885	5,700	0,099	2,137	0,110	0,700	5,6E-14	
5-6 m	11,885	5,700	0,099	2,137	0,113	0,933	5,7E-14	
5-6 m	11,885	5,700	0,099	2,137	0,118	1,317	5,7E-14	
5-6 m	11,885	5,700	0,099	2,137	0,124	1,783	5,8E-14	
5-6 m	11,885	5,700	0,099	2,137	0,131	2,317	5,7E-14	
5-6 m	11,885	5,700	0,099	2,137	0,138	2,950	5,8E-14	
5-6 m	11,885	5,700	0,099	2,137	0,145	3,550	5,7E-14	

Podle tabulky 1 odpovídá zde propustnost velmi slabé při tlaku bočního stlačení 100 psi (0,689 MPa) i 300 psi (2,068 MPa). Na grafu 4 je vidět závislost průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem.

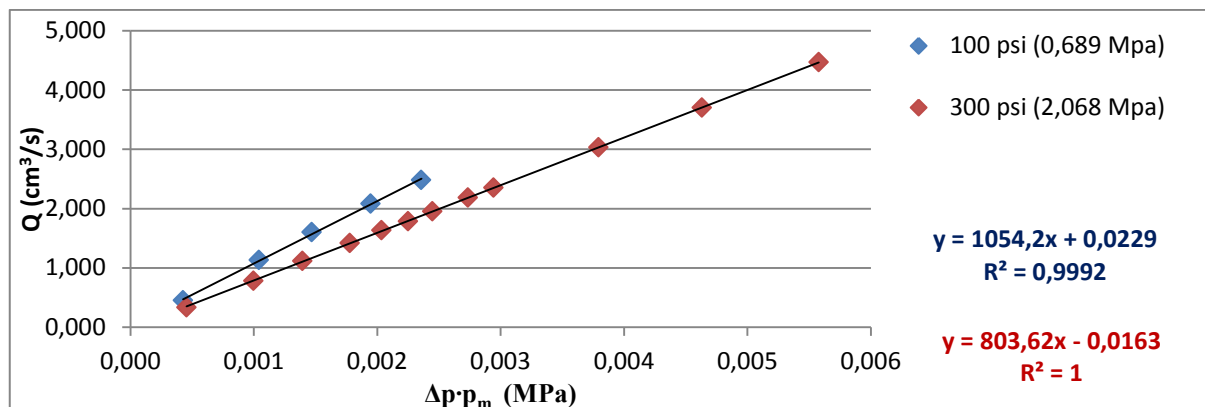
Tabulka 6: naměřené hodnoty jadérek z jádra odvrtaného 90 dní po odlití komínu z intervalu 6.- 7. m

Interval odběru jadérka	Průtočná plocha jadérka (cm ²)	Délka jadérka (cm)	Tlak na výstupu (MPa)	Tlak bočního stlačení (MPa)	Tlak na vstupu (MPa)	Průtok plynu (cm ³ /s)	Efektivní propustnost (m ²)	Celková propustnost (m ²)
6-7 m	11,885	5,900	0,099	0,724	0,103	0,450	9,9E-14	9,2E-14
6-7 m	11,885	5,900	0,099	0,724	0,109	1,133	1,0E-13	
6-7 m	11,885	5,900	0,099	0,724	0,113	1,600	1,0E-13	
6-7 m	11,885	5,900	0,099	0,724	0,117	2,083	1,0E-13	
6-7 m	11,885	5,900	0,099	0,724	0,121	2,483	9,8E-14	
6-7 m	11,885	5,900	0,099	2,137	0,104	0,333	6,8E-14	7,0E-14
6-7 m	11,885	5,900	0,099	2,137	0,109	0,783	7,3E-14	
6-7 m	11,885	5,900	0,099	2,137	0,112	1,117	7,5E-14	
6-7 m	11,885	5,900	0,099	2,137	0,116	1,417	7,4E-14	
6-7 m	11,885	5,900	0,099	2,137	0,118	1,633	7,5E-14	
6-7 m	11,885	5,900	0,099	2,137	0,120	1,783	7,4E-14	
6-7 m	11,885	5,900	0,099	2,137	0,121	1,950	7,4E-14	
6-7 m	11,885	5,900	0,099	2,137	0,124	2,183	7,4E-14	
6-7 m	11,885	5,900	0,099	2,137	0,125	2,350	7,5E-14	
6-7 m	11,885	5,900	0,099	2,137	0,132	3,033	7,5E-14	
6-7 m	11,885	5,900	0,099	2,137	0,138	3,700	7,5E-14	
6-7 m	11,885	5,900	0,099	2,137	0,145	4,467	7,5E-14	

Podle tabulky 1 odpovídá zde propustnost velmi slabé při tlaku bočního stlačení 100 psi (0,689 MPa) i 300 psi (2,068 MPa). Na grafu 5 je vidět závislost průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem.



Graf 4: závislosti průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem u jadérka z vrtu odvrtaného 90 dní po odlití komínu z intervalu 5. – 6. m



Graf 5: závislosti průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem u jáderka z vrtu odvrtného 90 dní po odlití komínu z intervalu 6. – 7. m

4.1.4 Vyhodnocení veličin jáderek z jádrového vrtu 120 dní po odlití pokusného komínu

Z tohoto vrtu byly odvrtny dvě jáderka cemento-popílkové směsi. U jáderka z intervalu 5. – 6. m byla naměřená délka 39,30 mm a průměr 36,70 mm. Tlak bočního stlačení byl nastaven na 100 psi (0,689 MPa) a 300 psi (2,068 MPa). Naměřená teplota byla 24°C. U jáderka z intervalu 6. – 7. m byla naměřená délka 56,60 mm a průměr 39,10 mm. Tlak bočního stlačení byl nastaven na 140 psi (0,965 MPa) a 360 psi (2,482 MPa). Naměřená teplota byla 23°C.

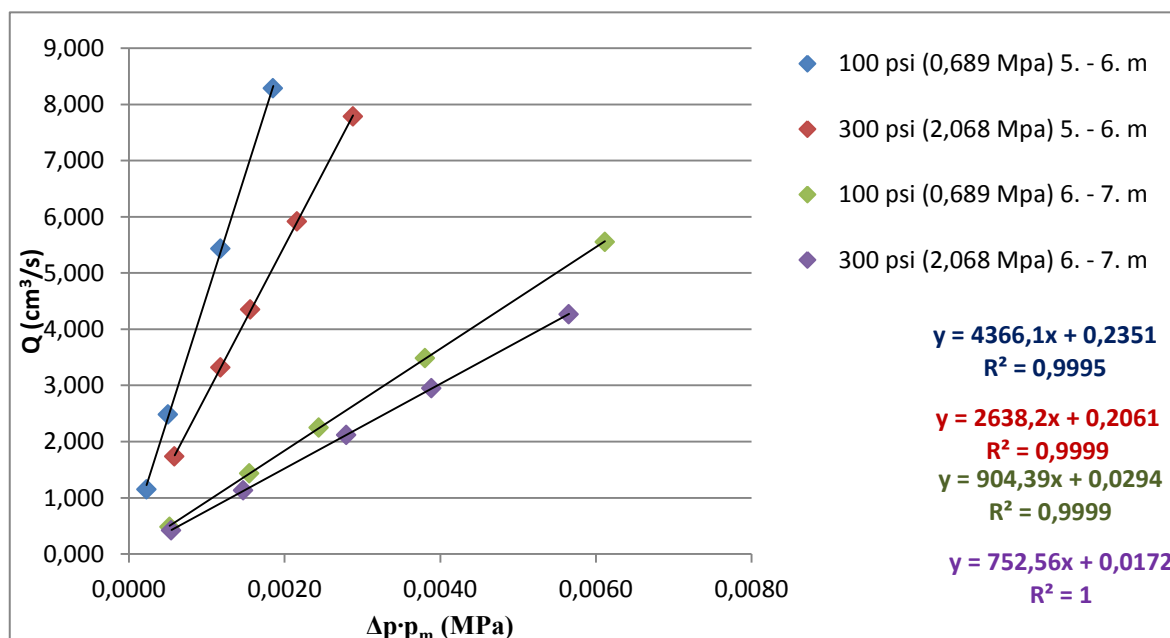
Tabulka 7: naměřené hodnoty jáderek z jádra odvrtného 120 dní po odlití komínu z intervalu 5.- 6. m

Interval odběru jáderka	Průtočná plocha jáderka (cm ²)	Délka jáderka (cm)	Tlak na výstupu (MPa)	Tlak bočního stlačení (MPa)	Tlak na vstupu (MPa)	Průtok plynu (cm ³ /s)	Efektivní propustnost (m ²)	Celková propustnost (m ²)
5-6 m	10,578	3,930	0,099	0,689	0,101	1,150	3,6E-13	2,8E-13
5-6 m	10,578	3,930	0,099	0,689	0,103	2,483	3,5E-13	
5-6 m	10,578	3,930	0,099	0,689	0,110	5,433	3,3E-13	
5-6 m	10,578	3,930	0,099	0,689	0,116	8,283	3,2E-13	
5-6 m	10,578	3,930	0,099	2,068	0,104	1,733	2,1E-13	1,7E-13
5-6 m	10,578	3,930	0,099	2,068	0,110	3,317	2,0E-13	
5-6 m	10,578	3,930	0,099	2,068	0,113	4,350	2,0E-13	
5-6 m	10,578	3,930	0,099	2,068	0,118	5,917	1,9E-13	
5-6 m	10,578	3,930	0,099	2,068	0,124	7,783	1,9E-13	

Tabulka 8: naměřené hodnoty jadérek z jádra odvrtaného 120 dní po odlití komínu z intervalu 6.- 7. m

Interval odběru jadérka	Průtočná plocha jadérka (cm ²)	Délka jadérka (cm)	Tlak na výstupu (MPa)	Tlak bočního stlačení (MPa)	Tlak na vstupu (MPa)	Průtok plynu (cm ³ /s)	Efektivní propustnost (m ²)	Celková propustnost (m ²)
6-7 m	12,007	5,660	0,099	0,965	0,104	0,483	8,3E-14	7,4E-14
6-7 m	12,007	5,660	0,099	0,965	0,113	1,433	8,3E-14	
6-7 m	12,007	5,660	0,099	0,965	0,121	2,250	8,3E-14	
6-7 m	12,007	5,660	0,099	0,965	0,132	3,483	8,2E-14	
6-7 m	12,007	5,660	0,099	0,965	0,148	5,550	8,2E-14	
6-7 m	12,007	5,660	0,099	2,482	0,104	0,417	6,8E-14	6,2E-14
6-7 m	12,007	5,660	0,099	2,482	0,112	1,133	6,9E-14	
6-7 m	12,007	5,660	0,099	2,482	0,124	2,117	6,8E-14	
6-7 m	12,007	5,660	0,099	2,482	0,132	2,950	6,8E-14	
6-7 m	12,007	5,660	0,099	2,482	0,145	4,267	6,7E-14	

Podle tabulky 1 odpovídá zde propustnost slabé při tlaku bočního stlačení 100 psi (0,689 MPa) i 300 psi (2,068 MPa) u jadérka z intervalu 5. – 6. m a velmi slabé u jadérka z intervalu 6. – 7. m. Na grafu 6 je vidět závislost průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem.



Graf 6: závislosti průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem u jadérka z vrtu odvrtaného 120 dní po odlití komínu

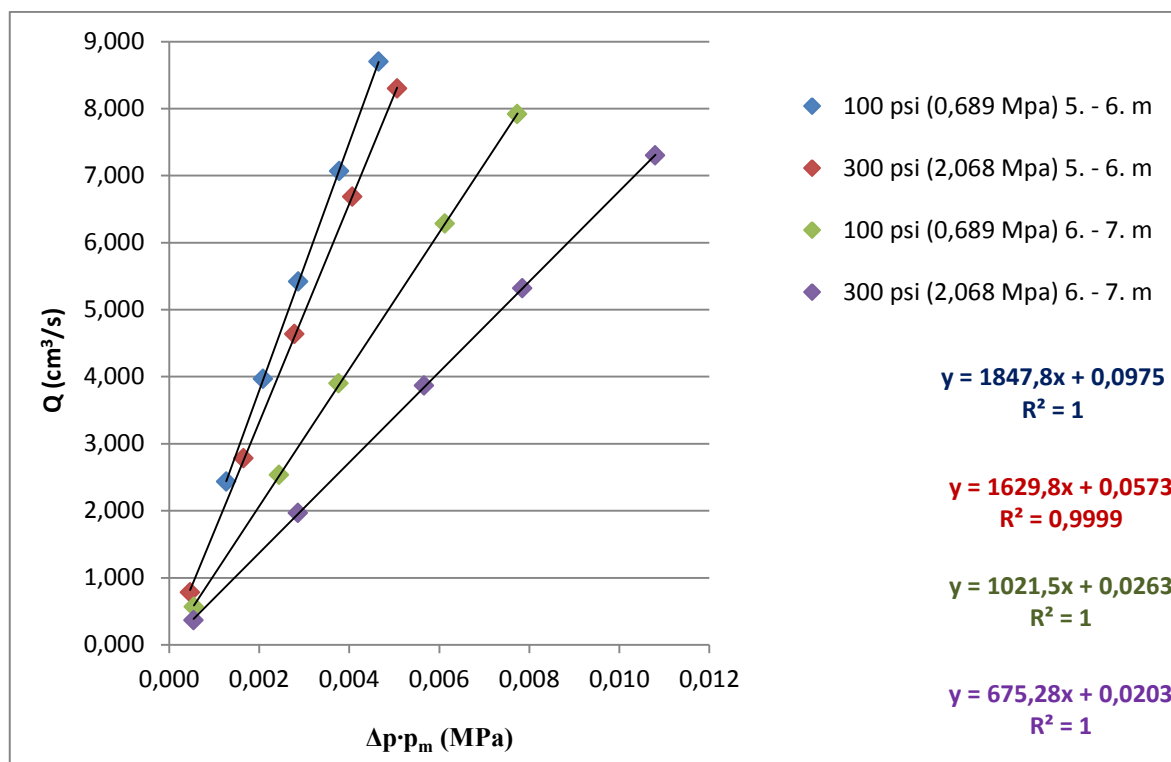
4.1.5 Vyhodnocení veličin jadérek z jádrového vrtu 180 dní po odlití pokusného komínu

Z tohoto vrtu byly odvrtány dvě jadérka směsi. U jadérka z intervalu 5. – 6. m byla naměřená délka 60,00 mm a průměr 39,00 mm. Tlak bočního stlačení byl nastaven na 140 psi (0,965 MPa) a 300 psi (2,068 MPa). U jadérka z intervalu 6. – 7. m byla naměřená délka 54,30 mm a průměr 39,10 mm. Tlak bočního stlačení byl nastaven na 80 psi (0,552 MPa) a 300 psi (2,068 MPa). Naměřená teplota byla 21 °C.

Tabulka 9: naměřené hodnoty jadérek z jádra odvrtaného 180 dní po odlití komínu

Interval odběru jadérka	Průtočná plocha jadérka (cm ²)	Délka jadérka (cm)	Tlak na výstupu (MPa)	Tlak bočního stlačení (MPa)	Tlak na vstupu (MPa)	Průtok plynu (cm ³ /s)	Efektivní propustnost (m ²)	Celková propustnost (m ²)
5-6 m	11,946	6,000	0,099	0,965	0,111	2,433	1,8E-13	1,6E-13
5-6 m	11,946	6,000	0,099	0,965	0,118	3,967	1,8E-13	
5-6 m	11,946	6,000	0,099	0,965	0,124	5,417	1,8E-13	
5-6 m	11,946	6,000	0,099	0,965	0,131	7,067	1,7E-13	
5-6 m	11,946	6,000	0,099	0,965	0,138	8,700	1,8E-13	
5-6 m	11,946	6,000	0,099	2,068	0,103	0,783	1,6E-13	5,9E-14
5-6 m	11,946	6,000	0,099	2,068	0,114	2,783	1,6E-13	
5-6 m	11,946	6,000	0,099	2,068	0,124	4,633	1,6E-13	
5-6 m	11,946	6,000	0,099	2,068	0,134	6,683	1,5E-13	
5-6 m	11,946	6,000	0,099	2,068	0,141	8,300	1,5E-13	
6-7 m	12,007	5,430	0,099	0,552	0,104	0,567	8,6E-14	8,1E-14
6-7 m	12,007	5,430	0,099	0,552	0,121	2,533	8,7E-14	
6-7 m	12,007	5,430	0,099	0,552	0,131	3,900	8,7E-14	
6-7 m	12,007	5,430	0,099	0,552	0,148	6,283	8,6E-14	
6-7 m	12,007	5,430	0,099	0,552	0,159	7,917	8,6E-14	
6-7 m	12,007	5,430	0,099	2,068	0,104	0,367	5,7E-14	5,3E-14
6-7 m	12,007	5,430	0,099	2,068	0,124	1,967	5,8E-14	
6-7 m	12,007	5,430	0,099	2,068	0,145	3,867	5,8E-14	
6-7 m	12,007	5,430	0,099	2,068	0,159	5,317	5,7E-14	
6-7 m	12,007	5,430	0,099	2,068	0,177	7,300	5,7E-14	

Podle tabulky 1 odpovídá zde propustnost slabé u jadérka odebraného z intervalu 5. – 6. m při tlaku bočního stlačení 100 psi (0,689 MPa) a velmi slabé při tlaku bočního stlačení 300 psi (2,068) a u jadérka odebraného z intervalu 6. – 7. m. Na grafu 7 je vidět závislost průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem.

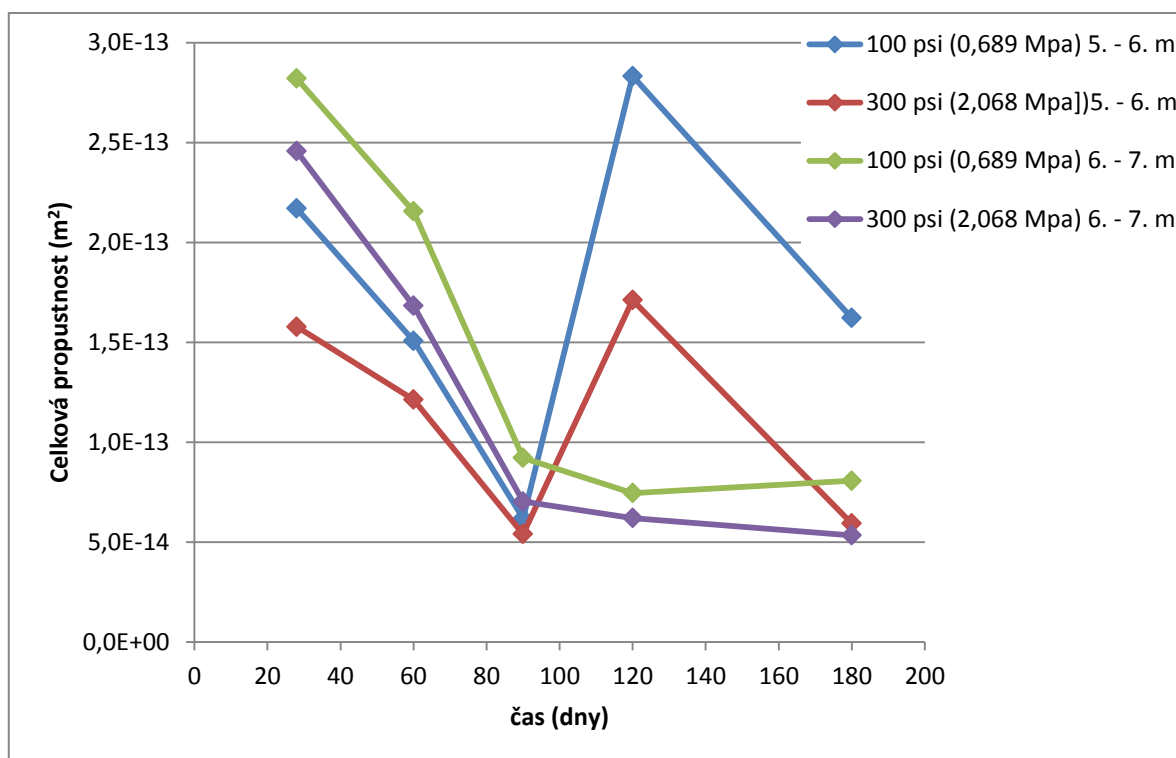


Graf 7: závislosti průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem u jáderka z vrtu odvrtného 180 dní po odlití komínu

4.2 Celkové zhodnocení cemento-popílkové směsi

Cemento-popílkovou směs, kterou byla vyplněná pokusná šachtice na lokalitě výsypky v Prostřední Suché nelze úplně s jistotou vyhodnotit, neboť bylo odvrtno 12 jáderek z 6 vrtných jader, ale hodnoceno bylo pouze 10 vzorků z důvodu nereálně naměřených dat pro výstupní tlak u jáderek odvrtných z jádra 14 dní po odlití komínu. Navíc vybudovaná pokusná šachtice měla hloubku 10 m a k dispozici byla data pouze ze dvou metrů. Navíc je třeba brát v úvahu, že již odebrané vzorky z experimentálního komínu nebyly v přirozeném stavu (např.: nebyly ovlivněny nadloží směsí). Podle naměřených hodnot by se dalo říci, že celková propustnost cemento-popílkové směsi klesala s postupujícím časem od vylití komínu, i když u vzorku odebraného 120 dní po odlití pokusného komínu z intervalu 5. – 6. m byla opět vyšší než u vzorku odebraného 90 dní po odlití komínu. Tuto vyšší propustnost pravděpodobně způsobilo, že jáderko bylo špatně upraveno a nemělo rovné hrany a proudění plynu mohlo probíhat i v okolí vzorku (viz obrázek 11). Podle tabulky 1 odpovídá propustnosti velmi

slabé až slabé tj. řádově $n \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ až $n \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$. Více je vidět z následujícího grafu závislosti celkové propustnosti na čase.



Graf 8: Závislosti celkové propustnosti na čase

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo laboratorní stanovení permeability cemento-popílkové směsi, sloužící jako izolační směs pro důlní díla testované na pokusné šachtici (komínu) na lokalitě výsypky v Prostřední Suché.

Při měření se pracovalo celkem s 12 vzorky upravených do tvaru válce odvrtných ze šesti vrtných jader pomocí přístroje Hilty. Jádérka byla odvrtná z intervalu 5. – 7. m pokusné šachtice. Jádrové vrtání bylo provedeno v intervalech 14, 28, 60, 90, 120 a 180 dní od dne vylití komínu směsí pomocí vrtné soupravy MVS-1. Pro laboratorní stanovení efektivní permeability byl použit permeametr (Gas Perm od firmy Vinci Technologies, Francie). Protože nebyla zaznamenána reálná data pro výstupní tlak u vzorků odvrtných z prvního vrtného jádra, pracovalo se dál pouze s naměřenými daty z 10 vzorků.

Hodnota celkové permeability byla potom spočítaná podle rovnice 22 pomocí programu Microsoft Office Excel 2007 a následně byla data zpracovaná graficky.

Ze zpracovaných dat v tabulkách 2 – 9 a z grafu 8 je vidět, že celková permeabilita byla nejvyšší u vzorku odvrtného z jádra 28 dní po vylití komínu cemento –popílkovou směsí z intervalu 6. – 7. m při tlaku bočního stlačení 100 psi (0,689 MPa) a to $2,8 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$. Nejnižší celková propustnost pak byla u vzorku z jádra z šestého vrtu z intervalu 6. – 7. m při tlaku bočního stlačení 300 psi (2,067 MPa) a to $5,3 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$. Dále bylo zjištěno, že od 28. dne do 90 dne po vylití komínu cemento-popílkovou směsí značně klesala a to průměrně o $1,7 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ při tlaku bočního stlačení 100 psi (0,689 MPa) a při tlaku bočního stlačení 300 psi (2,067 MPa) klesla průměrně o $1,3 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$. Potom do 180 dne se propustnost výrazněji neměnila (změny mohou být způsobeny nehomogenitou materiálu). Vyšší celková permeabilita u vzorku odvrtného z jádra z pátého vrtu je pravděpodobně způsobená nerovností hran na tomto jádérku (viz obr. 11).

Celkovou permeabilitu cemento-popílkové směsi, která vyplňovala pokusný komín na lokalitě výsypky v Prostřední Suché nelze s úplnou jistotou vyhodnotit, neboť bylo pracováno pouze s daty z 10 vzorků a to jen z intervalu 5. – 7. m. Odvrtné vzorky již nebyly v přirozeném stavu (např.: nepůsobilo na ně nadloží směsí, byly jinak stlačeny). Podle tabulky 1 byla celková propustnost cemento-popílkové směsi vyhodnocená jako velmi slabá až slabá.

6 Seznam použité literatury

BLÁHA Karel, Pavla KAČÁBOVÁ a Jan GRUNTORÁD: *Základní principy hydrogeologie*, metodická příručka MŽP, 2010

BUJOK, Petr. *Podzemní hydraulika I*. VŠB - TU Ostrava. Ostrava, 1989.

BUJOK Petr, Aleš POLÁČEK, Pavel POSPÍŠIL, Luděk KOVÁŘ, Arnošt GRMELA, Martin KLEMPA, Michal PORZER, Ján PAVLUŠ, Miloš WEIPER, Lumír SELZER, Martina HALATOVÁ a Dalibor KALUS: *Aktualizovaný projekt č. 35 – Na řešení revitalizace Moravskoslezského kraje „Komplexní řešení problematiky metanu ve vazbě na stará důlní díla.“* Dílčí zpráva z položky 35/L2-1 „Vědecko-výzkumná podpora – Geofyzikální a vrtný průzkum na podporu řešení úkolů D2, D3-2 a F“, 2013

GEHLIN, S.E.A. a G. HELLSTRÖM. Influence on thermal response test by groundwater flow in vertical fractures in hard rock. *Renewable Energy*. 2003, roč. 28, č. 14, s. 2221-2238. DOI: 10.1016/S0960-1481(03)00128-9.

GRMELA Arnošt: *Hydrosféra – vody podzemní - původ, zákonitosti pohybu a akumulace*, VŠB- TU Ostrava, 2007

HALATOVÁ Martina: *Laboratorní stanovení petrofyzikální charakteristiky vybraných vzorků vrtného jádra*, bakalářská práce VŠB- TU Ostrava, 2013

HOMOLA, Vladimír a Arnošt GRMELA. *Cvičení z hydrogeologie I*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 1991, 158 - 181.

KOBR Miroslav, Marta CHLUPÁČOVÁ, František MAREK, Jaroslav KNĚZ, Milan MATOLÍN a Stanislav HRÁCH: *Petrofyzika*, skriptum, Univerzity Karlovy, 1997, první vydání, ISBN 80- 7184- 339- 3

KOPEČNÝ, Jan, Eva JANUROVÁ, Jaroslav FOUKAL, Karla BARČOVÁ, Radim UHLÁŘ a Milena KUŠNEROVÁ. *Fyzika pro bakaláře*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2006, 254 - 288. ISBN 80-248-1200-2.

SLIVKA Vladimír, Jiří MALÍŠ a Kristýna ČERNÁ: Sdružení „Aktualizovaný projekt č. 35 KTUALIZOVANÝ PROJEKT č. 35 – Na řešení revitalizace Moravskoslezského kraje „Komplexní řešení problematiky metanu ve vazbě na stará důlní díla“, Dílčí zpráva z položky 35/L2, „Výzkum stavebních výplňových směsí za rok 2013“, 2013

PETROŠ Vladimír: *Vlastnosti hornin a horského masivu*, skripta VŠB – TU OSTRAVA, ISBN 8070787201, 9788070787205, 2002

ŠAMALÍKOVÁ Milena, Jiří LOCKER a Pavel POSPÍŠIL: *Geologie*, Učební texty pro studium distančního a denního studia, VUT - Brno, ISBN 8021406089, 9788021406087, 1995.

TIAB Djebbar, Erle C. DONALDSON: *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. 2nd ed. Boston: Gulf Professional Pub., c 2004, xxvi, 889 p. ISBN 07-506-7711-2.

VINCI TECHNOLOGIES SA *Gas Perm Educational Series: Operating Manual*. Francie, 2010a.

VINCI TECHNOLOGIES SA *LiquidPerm: Operating Manual*. Francie, 2010b.

VINCI TECHNOLOGIES SA. *BRP 350: Benchtop Relative Permeameter*. Francie, 2011.

7 Seznam elektronických zdrojů

BARTKOVÁ, H. a P. KLUSOŇ. *Stanovení povrchové smáčivosti tenkých vrstev a odbourávání povrchově vázaných nečistot*. [online]. [cit. 2014-07-23]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/kot/resources/studijni-materialy/labchcht-001/n150013-b6.pdf>

BOKR, Pavel. GeoWeb: Dotaz: podzemní voda, prameny. [online]. 1999 [cit. 2014-08-06]. Dostupné z: <http://www.gweb.cz/dotazy/d-230/>

KRAUSS ED a D.C. MAYS. Modification of the Kozeny-Carman Equation To Quantify Formation Damage by Fines in Clean, Unconsolidated Porous Media. SPE Reservoir Evaluation. 2014, 7 s. DOI: 10.2118/165148-PA. Dostupné z: [//www.onepetro.org/doi/10.2118/165148-PA](http://www.onepetro.org/doi/10.2118/165148-PA)

Jednotky.cz: Převody jednotek. [online]. [cit. 2014-08-06]. Dostupné z: <http://www.jednotky.cz/>

Gas Viscosity Calculator. [online]. [cit. 2014-08-06]. Dostupné z: <http://www.lmnoeng.com/Flow/GasViscosity.php>

8 Seznam tabulek

Tabulka 1: Klasifikace propustnosti hornin (<i>Jetel 1973 in Bujok 1989</i>).....	7
Tabulka 2: naměřené hodnoty jadérek z jádra odvrtného 28 dní po odlití komínu	24
Tabulka 3: naměřené hodnoty jadérek z jádra odvrtného 60 dní po odlití komínu z intervalu 5.- 6. m	25
Tabulka 4: naměřené hodnoty jadérek z jádra odvrtného 60 dní po odlití komínu z intervalu 6.- 7. m	26
Tabulka 5: naměřené hodnoty jadérek z jádra odvrtného 90 dní po odlití komínu z intervalu 5.- 6. m	27
Tabulka 6: naměřené hodnoty jadérek z jádra odvrtného 90 dní po odlití komínu z intervalu 6.- 7. m	28
Tabulka 7: naměřené hodnoty jadérek z jádra odvrtného 90 dní po odlití komínu z intervalu 5.- 6. m	29
Tabulka 8: naměřené hodnoty jadérek z jádra odvrtného 90 dní po odlití komínu z intervalu 6.- 7. m	30
Tabulka 9: naměřené hodnoty jadérek z jádra odvrtného 180 dní po odlití komínu	31

9 Seznam Grafů

<i>Graf 1: závislost rozdílu vstupního a výstupního tlaku na průtoku u celkové propustnosti</i>	<i>10</i>
<i>Graf 2: závislosti průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem u jáderka z vrtu odvrtného 28 dní po odlití komínu</i>	<i>25</i>
<i>Graf 3: závislosti průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem u jáderka z vrtu odvrtného 60 dní po odlití komínu</i>	<i>26</i>
<i>Graf 4: závislosti průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem u jáderka z vrtu odvrtného 90 dní po odlití komínu z intervalu 5. – 6. m.....</i>	<i>28</i>
<i>Graf 5: závislosti průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem u jáderka z vrtu odvrtného 90 dní po odlití komínu z intervalu 6. – 7. m.....</i>	<i>29</i>
<i>Graf 6: závislosti průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem u jáderka z vrtu odvrtného 120 dní po odlití komínu</i>	<i>30</i>
<i>Graf 7: závislosti průtoku na rozdílu vstupního a výstupního tlaku vynásobeného průměrným tlakem u jáderka z vrtu odvrtného 180 dní po odlití komínu</i>	<i>32</i>
<i>Graf 8: Závislosti celkové propustnosti na čase</i>	<i>33</i>

10 Seznam rovnic

<i>Rovnice 1</i>	4
<i>Rovnice 2</i>	4
<i>Rovnice 3</i>	6
<i>Rovnice 4</i>	7
<i>Rovnice 5</i>	8
<i>Rovnice 6</i>	9
<i>Rovnice 7</i>	10
<i>Rovnice 8</i>	11
<i>Rovnice 9</i>	12
<i>Rovnice 10</i>	12
<i>Rovnice 11</i>	13
<i>Rovnice 12</i>	13
<i>Rovnice 13</i>	13
<i>Rovnice 14</i>	13
<i>Rovnice 15</i>	14
<i>Rovnice 16</i>	15
<i>Rovnice 17</i>	15
<i>Rovnice 18</i>	15
<i>Rovnice 19</i>	15
<i>Rovnice 20</i>	15
<i>Rovnice 21</i>	16
<i>Rovnice 22</i>	22

11 Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: celková pórovitost (Bujok 1989, upraveno)</i>	4
<i>Obrázek 2: otevřená pórovitost (Bujok 1989, upraveno)</i>	5
<i>Obrázek 3: účinná pórovitost (Bujok 1989, upraveno)</i>	5
<i>Obrázek 4: Schéma filtračního zařízení podle H. Darcyho (Bujok 1989, upraveno)</i>	8
<i>Obrázek 5: Křemitý písek použitý ve směsi</i>	18
<i>Obrázek 6: Schéma situování vrtů</i>	19
<i>Obrázek 7: Jádrovák před vyprázdněním (Dílčí zpráva z položky 35/L 2-1)</i>	19
<i>Obrázek 8: Vrtný přístroj Hilty</i>	20
<i>Obrázek 9: Permeametr (GasPerm firmy Vinci, Francie)</i>	21
<i>Obrázek 10: Vzorek cemento-popílkové směsi</i>	21
<i>Obrázek 11: jádérko z intervalu 5. - 6. m z 5. vrtu</i>	23
<i>Obrázek 12: jádérko z intervalu 6. - 7. m z 3. vrtu</i>	23